

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ НАГРЕВАНИИ КАБЕЛЬНЫХ ТЕРМОПАР

Ю.К. Атрошенко, Ю.Е. Балахнина

Научный руководитель - старший преподаватель Ю.К. Атрошенко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Кабельные термопары получили широкое распространение в качестве датчиков температуры на современных промышленных и хозяйственных объектах. Связано это, прежде всего, с более удобной для монтажа конструкцией, а также меньшей инерционностью по сравнению с проволоочными термопарами [4, 5]. Основное отличие таких датчиков от проволоочных термопар заключается в использовании термопарного кабеля. При этом конструкция рабочего конца чувствительного элемента таких датчиков отличается от проволоочных только размерами: для кабельных термопар возможны меньшие значения диаметра термоэлектродов и чувствительного элемента в целом, что позволяет получить меньшие значения инерционности.

При проектировании систем управления, а также систем защит и блокировок большое значение имеет знание характеристик работы средств измерения температуры. Это связано с тем, что диапазон измерений, инерционность работы, монтажные размеры и другие параметры оказывают определяющее влияние не только на выбор типа датчика, но и на параметры настройки проектируемой системы [1]. В связи с этим прогностический математический аппарат, позволяющий моделировать различные условия измерений, будет полезен как обслуживающим службам КИПиА, так и инженерам-разработчикам.

Конструкция кабельной термопары показана на рис. 1, а. Конструкция рабочего конца чувствительного элемента показана на рисунке 1, б.

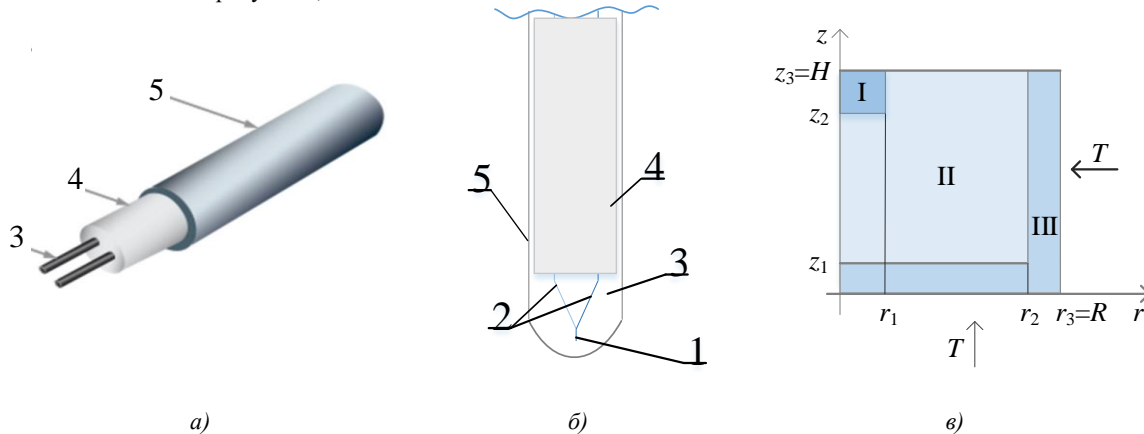


Рис. 1. Конструкция кабельной термопары (а), рабочего конца чувствительного элемента (б) и область решения задачи теплопереноса (в): 1, I – спай термопары; 2 – термоэлектроды; 3, II – изолирующий порошок; 4 – минеральная изоляция кабеля; 5, III – металлический чехол

В процессе моделирования рассматривались условия равномерного нагрева датчика (поддержание постоянной температуры на наружной поверхности датчика). Требуемая длительность выполнения измерения определялась как продолжительность достижения спаем термопары измеряемой температуры в пределах допускаемой погрешности, устанавливаемой нормативными документами [2].

Начальная температура чувствительного элемента датчика соответствует нормальным условиям и составляет 293 К. Область решения задачи теплопереноса показана на рис. 1, в. Рассматриваемая система представляет собой неоднородную систему «спай – изолирующий порошок – защитный чехол». Процесс теплопереноса в описанной системе описывается системой дифференциальных уравнений:

$$c_I \rho_I \frac{\partial T_I}{\partial t} = \lambda_I \left(\frac{\partial^2 T_I}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_I}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_I}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_1, z_2 < z < H; \quad (1)$$

$$c_{II} \rho_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \lambda_{II} \left(\frac{\partial^2 T_{II}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_2, z_1 < z < z_2; r_1 < r < r_2, z_2 < z < H; \quad (2)$$

$$c_{III} \rho_{III} \frac{\partial T_{III}}{\partial t} = \lambda_{III} \left(\frac{\partial^2 T_{III}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{III}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{III}}{\partial z^2} \right), t > 0, 0 < r < r_3, 0 < z < z_1; r_2 < r < r_3, z_1 < z < H. \quad (3)$$

В приведенных уравнениях применены следующие обозначения: r – радиальная координата, м; z – осевая координата, м. Остальные обозначения соответствуют приведенным в таблице ниже. На внутренних границах системы установлены граничные условия IV рода, краевые условия применены аналогично моделям в работе [3].

Решение системы уравнений (1) – (3) выполняется методом конечных разностей с применением программного комплекса Matlab [3]. Теплофизические характеристики элементов конструкции типичного термопарного датчика (рис. 1) аппроксимированы в рассматриваемом диапазоне температур методом наименьших квадратов по справочным значениям [3, 6] и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Аппроксимационные выражения для определения теплофизических характеристик элементов термопары

| Элемент | Характеристика | Ед. изм. | Аппроксимационное выражение |
|---|--|-------------------|--|
| Спай термопары ТХА (К) | Плотность ρ | кг/м ³ | 8825 (постоянное значение) |
| | Коэффициент теплопроводности λ | Вт/(м·°C) | $-9 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 0,0237 \cdot T + 15,07$ |
| | Удельная теплоемкость c | Дж/(кг·°C) | $-5 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 0,126 \cdot T + 414,69$ |
| Минеральная изоляция MgO | Плотность ρ | кг/м ³ | $-3 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,1041 \cdot T + 3613,9$ |
| | Коэффициент теплопроводности λ | Вт/(м·°C) | $2 \cdot 10^{-15} \cdot T^6 - 10^{-11} \cdot T^5 + 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,0164 \cdot T^2 - 5,0543 \cdot T + 668,32$ |
| | Удельная теплоемкость c | Дж/(кг·°C) | $-9 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 - 0,0052 \cdot T^2 + 3,5244 \cdot T + 254,25$ |
| Минеральная изоляция Al ₂ O ₃ | Плотность ρ | кг/м ³ | $-9 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0888 \cdot T + 3997,6$ |
| | Коэффициент теплопроводности λ | Вт/(м·°C) | $-4 \cdot 10^{-12} \cdot T^5 + 10^{-8} \cdot T^4 - 10^{-5} \cdot T^3 + 0,0076 \cdot T^2 - 2,2283 \cdot T + 229,5$ |
| | Удельная теплоемкость c | Дж/(кг·°C) | $-10^{-8} \cdot T^4 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0,0266 \cdot T^2 + 12,404 \cdot T - 1186,7$ |
| Защитный чехол Сталь 12X18Н10Т | Плотность ρ | кг/м ³ | $5 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 0,0002 \cdot T^3 + 0,1976 \cdot T^2 - 106,14 \cdot T + 29107$ |
| | Коэффициент теплопроводности λ | Вт/(м·°C) | $0,015 \cdot T + 10,405$ |
| | Удельная теплоемкость c | Дж/(кг·°C) | 538 (постоянное значение) |

Распределение температуры в рабочем конце чувствительного элемента кабельной хромель-алюмелевой термопары (типа К) показано на рис. 2.

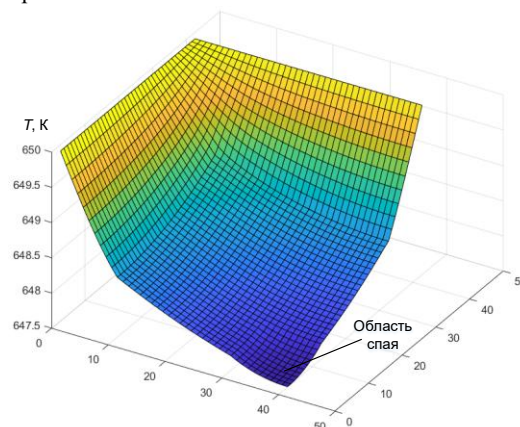


Рис. 2. Температурное поле в чувствительном элементе кабельной термопары типа ТХА (К)

Разработана модель процесса теплопереноса, описывающая нагревание рабочего конца кабельной термопары в процессе ее эксплуатации. Описанная модель позволяет выполнять прогностические расчеты параметров работы термопарных датчиков в различных условиях монтажа. Полученные результаты могут быть использованы как в процессе эксплуатации измерительных преобразователей, так и на этапе проектирования систем автоматического регулирования и блокировок.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-38-00028).

Литература

- Атрошенко Ю.К., Стрижак П.А. Необходимое время измерения термоэлектрическими преобразователями с защитными гильзами // Датчики и системы. – Москва, 2015. – № 5 (192). – С. 23 – 27 с.
- ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические: общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 15 с.
- Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука. 1989. – 616 с.
- Тимонин А.С., Донецкий В.И., Петрунин С.Л. Испытания по оценке живучести внутриреакторных термопар при запроектной аварии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – Москва, 2018. – № 3. – С. 106 – 112 с.
- Филиппович П.А., Гурова С.А. Метод снижения инерционности термопарного кабеля КТМС на основе переменного сечения для повышения надежности в авиационной и ракетно-космической технике // Информационно-технологический вестник. – Королев, 2019. – № 2 (20). – С. 65 – 71 с.